

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ИСЭ СО РАН,
Академик РАН



Н. Абасов Ратахин Н.А.

«14 » ноября 2017

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Склярова Владислава Фатыховича «ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ СУБМИЛЛИМЕТРОВЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН ИЗ ПЛАЗМЫ ПРИ КОЛЛЕКТИВНОЙ РЕЛАКСАЦИИ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В МНОГОПРОБОЧНОЙ ЛОВУШКЕ ГОЛ-3», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Актуальность темы исследования

Тематика диссертационной работы Склярова В. Ф. связана с изучением характеристик эмиссии электромагнитных волн при коллективной релаксации электронного пучка в плазме и определением перспективности создания специализированных генераторов электромагнитного излучения на основе пучково-плазменного взаимодействия, и представляется актуальной. Действительно, в задачах управляемого термоядерного синтеза важную для глубокого понимания физических процессов роль играют наборы диагностики, которые могут давать адекватную информацию для того или иного метода нагрева плазмы. Для нагрева плазмы в открытых ловушках применяется инжекция мощных электронных пучков и в этом случае достаточно информативными могут становиться характеристики электромагнитной эмиссии из плазмы. Кроме этого, задачи, решаемые в ходе выполнения данной диссертационной работы и развития современных методов электромагнитной диагностики, как дополнительного инструмента для получения знаний являются актуальными в целом для физики плазмы, электрофизики и других смежных направлений.

Оценка структуры и содержания работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, библиографического списка, а также одного приложения. Работа выполнена на 151 листах и содержит 75 рисунков и 1 таблицу. Библиографический список включает в себя 247 наименований.

В первой главе проведён обзор работ, посвященных основным физическим процессам, протекающим в плазме, которые могут приводить к генерации

электромагнитного излучения вблизи плазменной частоты, а также её удвоенного значения. Основное внимание уделено процессам нелинейного взаимодействия плазменных волн с образованием электромагнитной волны.

Во второй главе описывается экспериментальная установка ГОЛ-3 (ИЯФ СО РАН), на которой были проведены эксперименты по генерации электромагнитного излучения из плазмы во время интенсивной релаксации электронных пучков. Также проводится обзор по диагностикам основных параметров плазмы, которые использовались при анализе экспериментальных данных.

В третьей главе описан комплекс радиометрических диагностик, при помощи которого были проведены измерения спектральной плотности мощности излучения в широком диапазоне частот, созданной при активном участии автора диссертации. В состав радиометрического комплекса входят 8-канальный полихроматор, позволяющий определить спектр анализируемого излучения в диапазоне частот от 100 до 550 ГГц; двухканальный поляриметр, дающий возможность проследить изменение двух взаимно-ортогональных компонент поляризации излучения; набор одиночных детекторов, позволяющих проводить обзорную регистрацию мощности эмиссии в разных точках по длине установки; а также широкополосный калориметр.

Четвёртая глава посвящена методике обработки экспериментальных данных, которая включает в себя устранение ложных срабатываний детектирующей аппаратуры, а также восстановление распределения спектральной плотности излучения по измерениям в нескольких независимых спектральных диапазонах детекторами с известной аппаратной функцией. Восстановление спектра производится путём решения обратной задачи на поиск ядра системы уравнений Фредгольма I-го рода. Для решения данной задачи искомая функция разлагается по базисным функциям, в качестве которых выступает последовательность из «ступенек» Хёвисайда. Здесь автором воплощены идеи, обеспечивающие авторегуляризацию решения с минимальным отклонением получаемой функции от экспериментальных величин, а также проверочное соотнесение результатов по теореме о среднем.

В пятой главе приводится описание экспериментов по наблюдению эмиссии электромагнитного излучения из плазмы во время коллективной релаксации электронного пучка. Отдельно рассматриваются эксперименты по релаксации релятивистского ($\gamma \approx 3$) и субрелятивистского ($\gamma \approx 1.2$) электронных пучков. В экспериментах с релятивистским пучком, экспериментально было установлено, что эмиссия электромагнитного излучения из плазмы происходит на стадии интенсивного нагрева плазмы. Излучение наблюдалось в частотном диапазоне вблизи верхнегибридной частоты, при этом излучение имеет поляризацию преимущественно вдоль магнитного поля. Выдвигается гипотеза, что излучение в плазме образуется из локальных областей с пониженной плотностью, поскольку во время релаксации электронного пучка, одновременно с раскачкой плазменных волн в плазме возникает пространственная модуляция плотности. В экспериментах по инжекции слаборелятивистского электронного пучка в плазму наблюдалась ещё более интенсивная генерация электромагнитного излучения вблизи первой гармоники верхнегибридной частоты, а также в полосе несколько ниже второй гармоники.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Таким образом, заключаем, что диссертация несёт в себе значительный объём новой экспериментальной информации, заметная доля которой анализируется и соотносится с известными моделями. Ряд полученных фактов ещё требует дополнительного осмысления. Однако, отметим, что структура диссертации не вполне сбалансирована, так как глава 5 примерно в 2-3 раза больше других глав. Эту главу можно было бы разделить на две части, – в соответствии с двумя вариантами применяемого электронного пучка. В этом случае материалы глав 3 и 4, можно было бы сгруппировать в одну главу, посвящённую методам измерений параметров излучения.

Соответствие содержания диссертации заявленной специальности и теме

Содержание диссертации полностью отвечает заявленной специальности. Название (тема) отражается в пятой главе.

Соответствие автореферата диссертации её содержанию

Автореферат диссертации в полной мере отражает её содержание.

Личный вклад соискателя в получении результатов

В ответах на вопросы автор показал компетентность и высокую квалификацию, не оставив никаких сомнений в авторстве защищаемых положений и выводов. Автор принимал участие в создании диагностического комплекса, планировании, подготовке и проведении экспериментов, обработке и анализе экспериментальных данных, проведении расчётов, подготовке публикаций. Тем не менее, очевидно, что работа Склярова В. Ф. является частью работы большого коллектива исследователей, о чём свидетельствует большое число соавторов во всех публикациях соискателя.

Степень достоверности результатов исследования

В части достоверности экспериментальных результатов остаются вопросы к оценке спектральной мощности излучения, учитывая исключительно сложную динамику разных спектральных компонент во времени. Возможно, более логичным было бы в положения вынести результаты измеренных значений энерговыделения вдоль длины установки, иллюстрируемые на рис. 5.9. К положению 6 также можно заметить, что доля мощности, расходуемой пучком на микроволновую эмиссию, оценена лишь по порядку величины (4%), так как занятый электромагнитным излучением объём оценивается по порядку. В тексте нигде не обсуждается возможность эмиссии микроволн не только в поперечном направлении, но и под малыми углами к оси установки. Однако в совокупности представленные положения и выводы чётко сформулированы и, в основном, все хорошо обоснованы в тексте диссертации. Полученные результаты хорошо известны специалистам, так как опубликованы в авторитетных журналах и докладывались на различных конференциях.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов

В рамках проведённой работы получена экспериментальные данные о свойствах электромагнитного излучения в диапазоне частот от 50 до 550 ГГц, образующегося в следствие релаксации мощного электронного пучка ($\gamma \approx 3$, $j_e \approx 2 \text{ кА} / \text{см}^2$) в плазме $n_e \approx 10^{14} \div 10^{15} \text{ см}^{-3}$, удерживаемой во внешнем магнитном поле ($B \approx 3.2 \div 4.8 \text{ Тл}$), а также в режиме работы со 100-кэВ пучком при инжекции в плазму с плотностью $n_e \approx 10^{12} \div 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Таким образом, в теоретическом плане результаты значимы для более глубокого понимания физических процессов в сложном объекте, каковым является плазма с

нагреваемой её электронным пучком. С практической точки зрения, полученные результаты могут быть использованы для последующих экспериментальных исследований, а созданный комплекс методик для измерений и обработки данных применим к другим исследованиям, имеющим дело с подготовкой плазмы для термоядерного синтеза.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации

Исходя из вышесказанного, многочисленные исследователи проблемы подготовки плазмы для термоядерного синтеза могут адаптировать методики и наработки данной диссертационной работы. Конкретно результаты и выводы диссертации В. Ф. Склярова, полученные при разработке комплекса электромагнитной диагностики, а также результаты её экспериментальной апробации могут быть использованы в Институте солнечно-земной физики СО РАН, в Институте вычислительных технологий СО РАН, в Институте общей физики им. А. М. Прохорова РАН и других.

Новизна полученных результатов

Впервые автором установлено: наличие эмиссии электромагнитного излучения в диапазоне от 50 до 550 ГГц релаксации релятивистского электронного пучка в плотной плазме, удерживаемой во внешнем магнитном поле. Таким образом, результаты измерений параметров электромагнитного излучения, представляет несомненную научную значимость и новизну.

Замечания по диссертационной работе

I. Имеется общее замечание по терминологии: (1) в формулировке положения 5 вместо термина «коррелирует» следовало бы говорить, что мощность излучения нарастает с увеличением темпа нагрева плазмы; (2) термин «диамагнетизм» воспринимается как жаргон, поскольку данная характеристика отвечает общепринятой величине газокинетического давления или плотности вложенной в плазму энергии.

II. Замечание к степени обоснованности научных положений

Среди шести выдвинутых автором научных положений первые четыре (1 - 4) носят, главным образом, описательный характер и вполне явно иллюстрируются в тексте. Однако, дополнительно, 2-е и 3-е положения содержат гипотезы о происхождении микроволновой эмиссии. Их обоснование, к сожалению, является не вполне чётким и однозначным в тексте диссертации. В частности, автор подчёркивает важную роль флуктуаций плотности плазмы и «конверсии плазменных волн» на этих флуктуациях. Возможно, следует говорить о комбинационном рассеянии электронов-осцилляторов (на плазмонах в провалах плотности), то есть таких электронов, которые набирают значительный поперечный импульс за счёт столкновительных процессов и отражений от магнитных пробок. Претензия может быть не только к «аморфному» термину «конверсия», но и к самой роли флуктуаций плотности для микроволновой эмиссии, а также отсутствию попыток по-новому интерпретировать неожиданные результаты. Например, в последнем эксперименте с относительно слаботочным пучком спектральная плотность мощности на два порядка выше, чем в случае сильноточного пучка. Вопрос – почему? – ведь в прежнем толковании механизма эмиссии как результата слияния плазмонов этот факт не только не находит подтверждения, но и сам по себе достаточно умозрителен. В частности, для того, чтобы результаты спектральных измерений приписывать верхнегибридной частоте следует как-то привлечь электроны, с их

циклотронной частотой! С другой стороны, осмысление отдельных полученных результатов ещё можно продолжить, оценивая их как задел на будущее.

Таким образом, сделанные замечания принципиально не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение по диссертации о соответствии её требованиям «Положения о порядке присуждения учёных степеней» по п. 9 и 10.

В целом диссертация Склярова В. Ф. на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 является научно-квалификационной работой, в которой на профессиональном уровне содержится решение задач создания диагностического комплекса и нахождения с его помощью параметров электромагнитной эмиссии из плотной плазмы, нагреваемой сильноточным электронным пучком. Решение этих задач имеет существенное значение для развития соответствующей отрасли знаний, а именно – физики плотной высокотемпературной плазмы.

Диссертация отвечает требованиям п. 9 и 10 «Положения о присуждении учёных степеней» ВАК РФ, утверждённого постановлением правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842, а её автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа рассмотрена на расширенном научном заседании отдела физической электроники ИСЭ СО РАН 9 ноября 2017 года, протокол № 2/17.

Заведующий отделом физической
электроники ИСЭ СО РАН,
доктор физико-математических наук



В. В. Ростов

Подпись Ростова В.В. заверяю
Ученый секретарь ИСЭ СО РАН, д.ф.-м.н.



И. В. Пегель

Ростов Владислав Владимирович,
доктор физико-математических наук,
01.04.04 – Физическая электроника
Федеральное государственное бюджетное учреждение
науки Институт сильноточной электроники
Сибирского отделения Российской академии наук
(ИСЭ СО РАН)

Адрес: 634055, г. Томск, пр. Академический, 2/3
Тел. (3822) 491-641
E-mail: rostov@lfe.hcei.tsc.ru